Aus dem Physiologischen Institut der Universität Tübingen
Direktor: Professor Dr. Arnt Kohlrausch

Einige einfache klinische Methoden zur gleichzeitigen Sauerstoff- und Kohlensäure-Bestimmung mit dem Kroghschen Spirometer

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Medizin, Chirurgie und Geburtshilfe
einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Wilhelm Kußmaul
aus Gnadental OA. Öhringen

1937

Buchdruckerei Albert Becht, Tübingen, Hirschgasse 16

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen

Dekan: Professor Dr. Dold.
Berichterstatter: Professor Dr. Kohlrausch.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Die Energiebilanz einer vollständigen Umsatzuntersuchung erhält man durch Feststellung von:

1. zugeführter Energie,
2. Energiegehalt des Kotes und Harnes,
3. durch Nahrungs- bzw. Reserven-Oxydation freigewordener Energie.

Der klinischen Energieumsatz-Bestimmung kommt meist nur die Aufgabe zu, Aufschluß über die durch Nahrungs- bzw. Reserven-Oxydation freigewordene Energie zu geben. Da Nahrungsaufnahme, Körperarbeit, niedrige Umgebungstemperatur, psychische Erregung u. a. m. den Umsatz steigern, ist für die klinische Beurteilung in erster Linie der Grundumsatz maßgebend. Außerdem bietet dieser — was für alle klinischen Untersuchungen von Bedeutung ist — die beste Vergleichsmöglichkeit, da immer dieselben inneren und äußeren Bedingungen hergestellt werden: vollständige körperliche und psychische Ruhe, Nüchternheit und behagliche Umgebungstemperatur. — Für diesen Aufgabenkreis kann die Feststellung der zugeführten Energie und des Energieverlustes im Kot und Harn gewöhnlich unterbleiben.

Dieser Energieumsatz, d. h. die durch Nahrungs- bzw. Reserven-Oxydation zur Aufrechterhaltung der Lebensfunktionen freigemachte Energie läßt sich mittelbar bestimmen aus dem kalorischen Äquivalent des zur Oxydation benötigten Sauerstoffs und der dabei freigewordenen Kohlensäure. Wie Zuntz nachgewiesen hat, gibt der Gaswechsel allein ebenso genaue Werte wie die unmittelbare Kalorimetrie.

Zu Beginn der Stoffwechseluntersuchungen wurde vorwiegend das CO_2-Äquivalent bestimmt. Die damit gefundenen Werte waren jedoch nicht befriedigend. Rubner, Stähelin, Benedict wiesen nach, daß die Wärmemenge, die bei der Bildung von einem Liter CO_2 entsteht, je nach der Art der oxydierten Nährstoffe um 30% differiert, während die Werte bei der Berechnung aus dem O_2-Verbrauch nur einen Unterschied von 7%

haben. Da die Art der oxydierten Nährstoffe das Volumen-Verhältnis von CO_2 zu O_2, den respiratorischen Quotienten (RQ), in bestimmter Weise beeinflußt, so kann man entsprechend dem RQ das dem Nährstoff-Verhältnis zugehörige O_2-Wärmeäquivalent einsetzen und dadurch die Unterschiedsbreite auf 1% herabdrücken. Das kalorische Äquivalent für 1 Liter O_2 ist nach:

Zuntz: 4,795—5,0581 Kal.

Rubner: 4,686—5,047 Kal.

Das kalorische Äquivalent für 1 Liter CO_2 ist nach:

Zuntz: 6,63—5,05 Kal.

Benedict: 6,68—5,04 Kal.

Über das Verhältnis von Nährstoffart, RQ und das zugehörige Wärmeäquivalent von 1 Liter O_2 gibt Zuntz folgende Tabelle an (ohne Berücksichtigung von zersetztem Eiweiß):

RQ	Wärmeäquivalent von 1 Liter O_2 = Kal.	Umgesetztes	
		Glykogen (gr)	Fett (gr)
0,7133	4,795	0,000	0,5072
0,72	4,8015	—	—
0,75	4,829	0,1543	0,4384
0,80	4,8748	0,3650	0,3507
0,85	4,9207	0,5756	0,2630
0,90	4,9665	0,7861	0,1753
0,95	5,0123	0,9966	0,0877
1,00	5,0581	1,2071	0,000

Knipping und Rona geben das dem jeweiligen RQ entsprechende O_2-Wärmeäquivalent mit folgender Tabelle an:

RQ . .	0,70	0,72	0,74	0,76	0,78	0,80	0,82
Kal. Lit O_2 .	4,678	4,702	4,727	4,752	4,776	4,801	4,825

0,84	0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	1,00
4,850	4,875	4,900	4,924	4,948	4,973	4,997	5,022	5,047

Derartige Berechnungen auf Grund des RQ sind nur dann möglich, wenn sich im Organismus keine Vorgänge abspielen, die für sich allein eine Erhöhung oder Erniedrigung des RQ über die Grenzen 0,70—1,00 hinaus bedingen (Rubner), z. B. Fettbildung aus Zucker , Zuckerbildung aus Eiweiß. Unter gewöhnlichen Bedingungen spielen derartige Prozesse beim Menschen eine so untergeordnete Rolle, daß die oben angeführten Tabellen benutzt werden können. Um auch diesen Abweichungen gerecht zu werden, gibt Andersen die Formel an:

$$1 \text{ Liter } O_2 = 4{,}686 + 1{,}23\,(Q - 0{,}707) \text{ Kal.},$$

wobei Q den RQ der umgesetzten N-freien Nährstoffe bedeutet.

Diese Erkenntnis, daß die Energieumsatzberechnung aus dem Wärmeäquivalent des O_2-Verbrauches bei festgelegtem RQ nur etwa 1% Fehlerbreite hat, legt Krogh den Untersuchungen des Menschen mit seinem Respirationsapparat (Spirometer) zugrunde. Durch eiweißarme Kost — die letzte Nahrungsaufnahme vor der Untersuchung soll 12—14 Stunden zurückliegen — wird der RQ auf 0,8—0,9 gebracht. Das Spirometer ist mit sauerstoffreicher Luft gefüllt. Die prozentuale Sauerstofferhöhung in der Atmungsluft bewirkt keinen erhöhten Sauerstoffverbrauch (A. V. Hill; C. N. H. Long; H. Lugton); die Atmung wird allerdings etwas flacher und langsamer (s. S. 7). Dagegen beeinflußt ein Sinken des Sauerstoffgehaltes unter 11% den Stoffwechsel (Durig). — Der Sauerstoffverbrauch wird durch die Volumverminderung des Spirometers gemessen, die CO_2 durch Natronkalk im Innern des Spirometers absorbiert. Die Volumverminderung wird als Kurve geschrieben; damit bekommt man zugleich ein Bild von der Regelmäßigkeit der Atmung während der Versuchsdauer. Anfang und Ende der Kurve sollen in derselben Atemphase liegen und zwar in der ungezwungenen tiefsten Ausatmung, da diese anatomisch-physiologisch immer denselben Stand erreicht und so die Ausatmungszacken in einer Geraden zu liegen kommen. Und nur solche „regelmäßigen" Kurven können ausgewertet werden, denn jede Änderung des Atemtyps ändert den Gaswechsel und bedingt dadurch falsche Werte. — Unmittelbaren Einfluß auf den Stoff- und Energie-Umsatz haben: Nahrung, Arzneimittel, Arbeit, Temperatur, Schlaf, psychische Erregung, inkretorische Drüsen, Alter und Geschlecht.

Vorbedingung für die Energieumsatz-Untersuchung mit alleiniger O_2-Bestimmung ist normales Verhalten, damit danach das entsprechende O_2-Äquivalent eingesetzt werden kann. Ist aber eine Abweichung des Stoffwechsels zu erwarten, so wird O_2- und CO_2-Bestimmung nötig. — Daher sind auch einige der zu klinischen Untersuchungen benutzten Apparate, der von Benedict, der von Grafe und der von Knipping, zur O_2- und CO_2-Bestimmung eingerichtet. Da aber bei Ärzten, in Kliniken, Krankenhäusern und Instituten das handliche Krogh'sche Spirometer [1]) zur Messung des O_2-Verbrauchs noch vielfach in Gebrauch ist, so soll im folgenden versucht werden, ob es nicht in einfacher klinisch verwendbarer Weise zur gleichzeitigen O_2- und CO_2-Messung umgestaltet werden kann. Es soll damit keineswegs etwa als eine Verbesserung gegenüber den anderen klinischen Apparaten hingestellt werden, sondern es soll nur so eingerichtet werden, daß es dort auch zur CO_2-Bestimmung verwandt werden kann [2]), wo es noch in Gebrauch ist und wo in der jetzigen wirtschaftlich schwierigen Zeit die anderen sehr teueren Apparate nicht zu beschaffen sind.

---

1) Hersteller z. B. L. Castagna u. Sohn, Wien; Preis etwa 200 RM.

2) Von **Helmreich** und **Wagner** [Biochem. Ztschr. **145**, 77: **149**, 560 (1924)] ist zwar schon ein dem **Krog**'schen ähnliches Spirometer zur CO_2-Bestimmung mit einem Differenz-Verfahren benutzt worden, aber diese Methode kann hier außer Betracht bleiben; denn bei **Helmreichs** und **Wagners** Spirometer handelt es sich um eine Neukonstruktion von 40 bzw. 100 l Inhalt, während in der vorliegenden Untersuchung das gewöhnliche **Krogh**sche Spirometer von etwa 5 l Gasinhalt zur gleichzeitigen O_2 und CO_2 Bestimmung eingerichtet werden soll. — Der Katalog von L. Castagna und Sohn, Wien, enthält eine Modifikation des **Krogh**schen Spirometers, die das O_2-Volumen, zugleich mit der CO_2-Masse registriert. Auch diese Konstruktion kann hier unberücksichtigt bleiben. Denn nach unseren Erfahrungen genügt das eine vorgeschaltete $CaCl_2$-Gefäß kaum zur H_2O-Bindung (s. S. 12), und außerdem dürfte der, schon beim Original **Krogh** beträchtliche, Atemwiderstand recht unangenehm groß werden (s. S. 7)

Die gleichzeitige O_2 -und CO_2-Messung mit dem Kroghschen Spirometer.

I. Allgemeines.

Das Prinzip des technischen Vorgehens ist klar und einfach: Die Bestimmung des O_2-Verbrauches durch Ausmessung der graphisch registrierten Volumenverminderung des Systems bleibt ungeändert. Aber die Vorrichtung zur Absorption der ausgeatmeten CO_2 muß aus dem Spirometer herausverlegt und so umgestaltet werden, daß die produzierte CO_2 gravimetrisch, titrimetrisch oder volumetrisch gemessen werden kann.

Dadurch ergeben sich zugleich zwei andere Vorteile: einmal fällt die unmittelbare Erwärmung des Spirometer-Inhalts durch die Erwärmung des Natronkalks bei der CO_2-und H_2O-Absorption fort. Und zweitens wird das ganze System von maximal etwa 6 l Gasraum um den Raum des ursprünglichen Natronkalkbehälters, etwa 12 l, vergrößert. Das hat den Vorteil, daß bei gleichem nutzbarem O_2-Vorrat die anfängliche O_2-Konzentration im Atemapparat geringer wird, statt etwa 70 bis 80% nur etwa 35—40% O_2. Damit fällt bei Versuchsbeginn die Störung durch Verlangsamung der Atmung, Verkleinerung der Atemexkursionen und N_2-Ausschwemmung nahezu oder ganz fort. schlossen.

Als weitere Vervollkommnung der Apparatur haben wir die Atembehinderung durch die Ventile, welche durch die CO_2-Meßvorrichtungen noch erheblich vergrößert wurde, beseitigt, und wie beim Benedict- oder Knippingapparat einen nach außen abgeschlossenen Luftkreislauf mit einer Rotationspumpe [3]) von 15 bis 30 l Luftförderung pro Minute eingeführt.

3) Bezogen von Edmund Bühler, Tübingen; Preis 30 RM. Die Rotationspumpe haben wir mit einem 0,2 PS-Motor von der Apparat-G.m.b.H., Elektrotechnische Fabrik, Esslingen (Preis 60 RM.) getrieben. Durch Änderung der Riemenscheibenübersetzung und des Vorschaltwiderstandes kann ihre Förderung leicht zwischen 15 und 30 L pro Minute verändert werden, ohne daß die Pumpe warm wird. Sie leistet maximal etwa 50 L gegen den Widerstand des Apparates, wird dabei aber bald sehr warm.

Die einzelnen Teile der Anordnung werden zweckmäßig folgendermaßen zu einem Kreislauf zusammengeschlossen: Mit dem Auslaß des Krogh-Spirometers wird die Saugeseite der Rotationspumpe verbunden; ihre Druckseite führt zur CO_2-Meßvorrichtung; danach folgt der Dreiwegehahn des Patientenanschlußes[4]), der unmittelbar zum Einlaß des Spirometers zurückführt. Um den Atemwiderstand für den Patienten unmerklich klein zu halten, muß vor allem diese letzte Schlauchverbindung zwischen Patient und Spirometereinlaß möglichst kurz und weit sein (26 mm Innendurchmesser), wie Knipping wiederholt betont. Für die Schläuche zwischen Spirometerauslaß, Pumpe, CO_2-Meßvorrichtung und Patientenanschluß genügen 15 mm Innendurchmesser.

Als Zusatzeinrichtungen können noch in Frage kommen:

1. Ein Sicherheitsventil, z. B. die Kugelsicherung von Knipping[5]), zwischen Spirometerauslaß und Pumpe, um auch bei Versuchsstörungen ein Ansaugen von Spirometersperrwasser in die Rotationspumpe auszuschließen. Daß der Patient bei Versuchsstörungen Sperrwasser in den Mund bekommen könnte, ist durch die Konstruktion des Kroghschen Spirometers ausgeschlossen.

2. Ein Stoßdämpfer, z. B. der von Knipping[6]), zwischen CO_2-Meßvorrichtung und Patientenanschluß, besonders wenn die CO_2 in Flüssigkeiten absorbiert wird. Denn das grobe Stoßen der Flüssigkeit behindert die Atmung.

3. Wenn die kreisende Luft in oder vor der CO_2-Meßvorichtung stark getrocknet wird, braucht man einen Anfeuchter vor dem Patientenanschluß. Wir benutzen entweder ein zylindrisches Glasgefäß von 10 cm Durchmesser und 20 oder mehr cm Länge mit Rohransätzen für die 15-mm-Schläuche; es wird locker gefüllt mit einer langen Rolle Filtrierpapier, das vor jedem Versuch gut mit Wasser durchtränkt wird. Oder wir nehmen eine doppelt tubulierte Flasche (s. S. 9), gefällt mit wasserdurchtränkten Bimssteinstücken als Anfeuchter.

4) Aus Messing in der Instituts-Werkstatt gebaut; er ähnelt dem Patientenanschluß von Knipping.

5) Alle von Knipping angegebenen Gaswechselapparate und ihre Einzelteile werden von Albert Dargatz, Hamburg, gebaut. Die Kugelsicherung kostet 3.50 RM.

6) Bezogen von Albert Dargatz, Hamburg; Preis 11.50 RM.

II. Die CO_2-Meßvorrichtungen.

Es sind die verschiedensten gewichtsanalytischen, titrimetrischen und volumetrischen Verfahren in Gebrauch. Von diesen Verfahren haben wir ausprobiert:

1. eine gewichtsanalytische Methode, ähnlich der von Benedict,
2. eine volumetrische Methode mit zwei Gasuhren und
3. die volumetrische Methode nach Knipping.

Sie sind alle drei auch mit bescheidenen Mitteln ausreichend genau zu gestalten, haben nur ihre noch zu besprechende größere oder geringere Bequemlichkeit für die klinische Verwendung (s. S. 24).

1. Gewichtsanalytische CO_2-Bestimmung.

Wie bei Benedict wird der Luftstromkreis durch eine große, doppelt tubulierte Flasche mit Natronkalkbrocken[7]) geleitet. Natronkalk absorbiert außer der Kohlensäure auch Wasser und gibt nach Kohlensäure-Absorption in bekannter Weise Wasser ab. Diese Wasseraufnahme und -abgabe hängt in unübersehbarem Maße vom jeweiligen Feuchtigkeitsgehalt des Natronkalks ab. Daher muß die Luft vor Eintritt in den Natronkalk und nach Austritt aus ihm so weitgehend getrocknet werden, daß das Gewicht des Natronkalks sich durch Wasserwechsel nicht mehr ändert. Nur dann ist die Gewichtszunahme des Natronkalks und der dahinter geschalteten Trocknungsflasche gleich dem Gewicht der absorbierten CO_2; andernfalls bekommt man Fehler durch Wasseraufnahme oder -abgabe.

Die von uns benutzten doppelt tubulierten Flaschen für den Natronkalk haben 13 cm Durchmesser und eine nutzbare Füllhöhe von ca 20 cm. Sie fassen etwa 1,5 kg Natronkalk und wiegen gefüllt etwa 3,5 kg. Da 1 kg Natronkalk etwa gut 30 gr CO_2 binden kann, reicht eine Flaschen-Füllung für etwa 7—8

7) Natronkalk zu beziehen von Merck oder anderen chemischen Fabriken; oder selbst herstellbar nach der Vorschrift von Benedict: Abderhaldens Handbuch d. biol. Arbeitsmethoden Abt. IV, Teil 10, Heft 3, S. 449.

Versuche zu je etwa 6 gr CO_2 am Menschen aus. Die Flaschen — für mehr Versuche ausreichend — größer zu nehmen, bringt keinen Vorteil, denn mit steigender Belastung wird die Wägung ungenauer bzw. eine stärkere Waage erforderlich. — Der obere Tubus der Flasche sitzt auf dem eingeschliffenen Deckel, der untere an der Flaschenwand ganz unten in Bodennähe. Über dem unteren Tubus haben wir aus feinem Drahtnetz einen doppelten Boden angebracht, damit sich die durchströmende Luft in dem dadurch entstehenden Hohlraum gleichmäßig zum Durchstreichen des Natronkalks von unten her verteilen kann. So eingerichtet kann die Flasche je nach Bequemlichkeit von unten oder von oben durchströmt werden. Der Flaschen-Deckel wird mit Fett eingedichtet und mit einer Weckglas-Klammer festgehalten. Zum Wiederabnehmen empfiehlt es sich, erst einige Zeit den Flaschenhals mit heißer werdendem Wasser anzuwärmen. — Damit der Natronkalk die CO_2 besser absorbiert, muß der käufliche trockne Natronkalk flach ausgebreitet und mit etwa 20 ccm H_2O pro kg mittels eines Zerstäubers angefeuchtet werden. Er entspricht dann in seinen Eigenschaften etwa dem nach der Benedictschen Vorschrift hergestellten.

Man findet die Ansicht vertreten, daß zur gewichtsanalytischen CO_2-Bestimmung eine sehr kostbare und umständlich zu bedienende Waage nötig sei. Das ist nicht richtig.

Wiegen die gefüllten Flaschen je etwa 3—4 kg, so genügt eine einfache große Schalenwaage, wie sie die Apotheker benutzen, und wie sie gewöhnlich in Laboratorien vorhanden ist. Sie sollte bei 3—4 kg Belastung noch eine Empfindlichkeit von etwa 0,1 bis 0,3 gr pro Skalenteil Zeigerausschlag haben. Fehlt eine Skala, dann klebt man einen Streifen Millimeterpapier hinter die Zeigerspitze; eine zu dicke Zeigerspitze feilt man scharf oder kittet eine feine, matt geschwärzte Nähnadelspitze an. So kann man auch eine sehr einfache Schalenwaage zu einem für den vorliegenden Zweck brauchbaren Meßinstrument machen, vorausgesetzt, daß sie für diese Belastung stabil genug ist, d. h. daß ihr Schwingungs-Nullpunkt konstant bleibt [8]). — Auch das Wägen

8) Sehr gute, stabile, grosse Schalenwaagen von der erforderlichen Belastbarkeit, Empfindlichkeit (0.1 gr pro Skalenteil bei 3 kg Belastung) und mit hervorragend konstantem Nullpunkt liefert die Firma Haigis-Rieber in Onstmettingen (Württ.) mit Gehäuse für 156 RM.

selbst kann sehr einfach und schnell ausgeführt werden. Wir wägen entsprechend dem Interpolationsverfahren[9]) mit Beobachtung des zeitigen Schwingungs-Nullpunkts, Beobachtung einer Schwingungseinstellung mit nahe richtigem Gewicht und Berechnung des genau abgleichenden Gewichts aus der für die jeweilige Belastung bekannten Empfindlichkeit der Waage. Für die Bestimmung eines Schwingungsmittelpunkts genügt die Beobachtung von 3 Umkehrpunkten. Nehmen wir dabei einen Beobachtungsfehler des Null- bzw. Schwingungsmittelpunktes von ± 0,3 Skalenteilen an, was schon recht hoch gegriffen ist, dann entspricht ihm ein Wägefehler von ± 0,03 gr bei einer Waagenempfindlichkeit von 0,1 gr pro Skalenteil. Diesem Wägefehler von ± 0,03 gr entsprechen ± 15 ccm CO_2, also bei dem Umsatz von etwa 3000 ccm CO_2 eines Versuches ± 0,5% Fehler. Entsprechend würden bei Empfindlichkeiten der Waage von 0,2 bzw. 0,3 gr pro Skalenteil Fehler von ± 1% bzw. ± 1,5% entstehen. — Das ist mindestens so genau, wie die Ausmessung der O_2-Verbrauchskurve am Krogh schen Spirometer. Denn 1 Skalenteil des Meßlineals sind 100 ccm O_2 und die Fußpunkte der Exspirationen kann man häufig nicht genauer als auf ½—1 Skalenteil verbinden; das wären bei etwa 3000 ccm O_2-Verbrauch eines Versuchs ± 1,7 bis ± 3,3% Meßfehler.

Die CO_2-Wägung mit einer einfachen, billigen Apotheker-Schalenwaage ist also reichlich so genau, wie die Ausmessung der O_2-Kurven am Krogh schen Spirometer. — Abgesehen von der strengen Einhaltung biologisch richtiger Untersuchungs-Bedingungen (s. S. 3, 7 u. 15), kommt also für die gewichtsanalytische CO_2-Bestimmung alles auf die Güte der vorangehenden und nachfolgenden Lufttrocknung an.

Der Wasserdampf in der Apparatur.

Im Benedict-Apparat für Menschen wird die Luft in großen Williams'schen Waschflaschen mit konz. H_2SO_4 getrocknet. Konzentrierte Schwefelsäure hat jedoch, namentlich bei biologischen Versuchen, Unannehmlichkeiten, die ihren Ersatz durch ein anderes Trockenmittel wünschenswert erscheinen lassen: Einmal

9) vergl. F. **Kohlrausch**: Lehrbuch der prakt. Physik, 11. Aufl. S. 55 ff.

riecht die Atemluft des Apparats immer etwas nach Schwefelsäure-Dämpfen, die Benedict mit einer besonderen Natriumbicarbonat-Büchse entfernt, damit sie die Versuchsperson nicht stören. Dann werden Gase und Dämpfe aus einem Gasgemisch nur dann in Flüssigkeiten rasch und vollständig absorbiert, wenn das Gasgemisch in ganz kleine Perlen hindurchstreicht. So kleine Luftperlen sind bei einer Zirkulationsgeschwindigkeit von 35 l Luft pro Minute, wie Benedict sie verwendet, schwer zu erreichen. Und schließlich haben auch mäßige Schichten von konz. H_2SO_4, noch dazu bei möglichst kleinen Luftperlen einen nicht unerheblichen Luftwiderstand. Er bedingt den Übelstand eines beträchtlichen Drucks zwischen der Pumpe und den Absorptionsreihen und damit eine entsprechend kräftige Pumpe. Diese erweist sich dann häufig als die am meisten gefährdete Stelle der Apparatur. — Die Chemiker verwenden zur Wasserabsorption bei Gasanalysen wieder vorwiegend gekörnte feste Stoffe.

Wir haben wie Benedict in seinem Kreislaufapparat für kleine Tiere gekörntes $CaCl_2$ (Merck) in den großen, vorher S. 9 beschriebenen, doppelt tubulierten Flaschen zum Trocknen benutzt. — Es wird behauptet, Calciumchlorid habe einen zu hohen Dampfdruck, und sei daher für den vorliegenden Zweck zum Trocknen unbrauchbar. Daß Calciumchlorid einen höheren Dampfdruck hat als konz. Schwefelsäure, ist richtig, aber das spielt praktisch keine große Rolle. Wesentlich ist, daß man eine genügend lange Schicht von $CaCl_2$ zum Trocknen vor und hinter den Natronkalk schaltet, und außerdem ein Feuchtigkeits-Gleichgewicht zwischen dem $CaCl_2$ und dem Natronkalk herstellt. — Benedict schaltet auch zwei Schwefelsäure-Waschflaschen vor seinen Natronkalk. Wir haben gefunden, daß zwei unserer Flaschen (etwa 40 cm Schichtlänge) mit $CaCl_2$ vor dem Natronkalk noch nicht genügen, daß aber aus drei Flaschen (etwa 60 cm Schichtlänge) die Luft genügend trocken herauskommt, wie die folgenden Kontrollversuche zeigen:

Es wurde im Leerversuch ohne Versuchsperson in der geschlossenen Apparatur Wasserdampf-gesättigte Luft von Zimmertemperatur mit einer Geschwindigkeit von etwa 25 l pro Minute etwa 15 Minuten lang herumgepumpt. Sie durchstrich drei $CaCl_2$-

Flaschen und hinter diesen noch zwei Waschflaschen mit konz. Schwefelsäure, die sie in möglichst kleinen Blasen durchperlte. Dahinter wurde sie mit mehreren Anfeuchtern sogleich wieder wassergesättigt. Die Bedingungen für die Wasseraufnahme und -abgabe entsprachen also denen im tatsächlichen Gasumsatzversuch. Wie die Wägung der $CaCl_2$- und H_2SO_4-Flaschen zeigte, hatten die einzelnen Flaschen durchschnittlich an Wasser aufgenommen:

I. $CaCl_2$	II. $CaCl_2$	III. $CaCl_2$	I. H_2SO_4	II. H_2SO_4
7,27 gr	0,21 gr	0,09 gr	0,05 gr	$\pm$ 0,00 gr

Man sieht an diesen Mittelwerten aus mehreren unter sich wenig differierenden Versuchen: Die erste $CaCl_2$-Flasche hat in 15 Minuten aus der gesättigten Luft über 7 gr Wasser aufgenommen, die zweite noch 0,2 gr, die dritte noch knapp 0,1 gr und damit ist die Luft nahezu trocken. Denn die erste H_2SO_4-Flasche hat den Rest, nur noch 0,05 gr Wasser aufgenommen. Dieses letzte Wasser wäre, im Versuch fälschlich als CO_2 gewogen = 25 ccm CO_2, also bei etwa 3000 ccm CO_2-Abgabe in 15 Minuten ein Fehler von nur etwa + 0,8%.

Aber wenn im tatsächlichen Umsatzversuch statt der H_2SO_4-Flaschen die Natronkalkflasche und die dahintergeschaltete $CaCl_2$-Flasche (h i n t e r dem Natronkalk genügt e i n e $CaCl_2$-Flasche) durchströmt werden, liegen die Bedingungen noch günstiger: es ist ein Wasserdampf-G l e i c h g e w i c h t vorhanden oder sehr bald von selbst eingestellt, v o r a u s g e s e t z t, daß man den trocknen Natronkalk pro kg mit etwa 20 ccm fein zerstäubten Wassers angefeuchtet hat (s. S. 10). Denn die geringe Menge Wasser, die aus dem III. $CaCl_2$-Gefäß noch von der H_2SO_4 ababsorbiert wird, ist offenbar z. T. vom letzten $CaCl_2$ wegen seines Dampfdrucks a b g e g e b e n, und wird im Natronkalk absorbiert. Da nun hinter dem Natronkalk noch ein ebenso großes $CaCl_2$-Gefäß kommt, das wegen seines Dampfdrucks ungefähr ebenso viel Wasser abgibt wie das III., so heben sich diese zwei kleinen Fehler nahezu gegenseitig auf: die Luft streicht im Wasserdampf-Gleichgewicht mit geringem und nahe konstant bleibendem H_2O-Gehalt durch die beiden Analysen-Flaschen. Kontrollversuche

wie vorher über den Wasserdampf-Umlauf, aber mit der Analysenapparatur (statt der H_2SO_4-Waschflaschen die Flasche mit Natronkalk und dahinter die IV. mit $CaCl_2$) zeigten: der Wasserdampf aus etwa 400—600 l Wasser-gesättigter Luft bleibt in den drei vorgeschalteten $CaCl_2$-Flaschen, und die Gewichts-Summe vom Natronkalk und dem IV. $CaCl_2$ ändert sich durch Wasserwechsel nicht mehr außerhalb der Fehlerbreite der Wägung. — Damit ist die praktische Brauchbarkeit des Calciumchlorid in hinreichend langer Schicht als Trockenmittel für Grundumsatzversuche am Menschen erwiesen.

Nachdem dies klargestellt ist, brauchen natürlich im GU.-Versuch die drei vorgeschalteten $CaCl_2$-Flaschen nicht auch gewogen zu werden. Bei den gleich zu besprechenden Kontrollversuchen mit Alkohol-Verbrennung haben wir es nur getan, um ganz sicher zu gehen. — Das beschriebene Wassergleichgewicht ist bei richtiger Feuchtigkeit des Natronkalks vorhanden oder recht bald von selbst hergestellt. Sicherheitshalber kann man nach frischer Füllung der Natronkalk-Flasche einen kurzen Selbstversuch oder eine Alkohol-Verbrennung einschalten (s. S. 15). — Das $CaCl_2$ und seine Verteilung auf drei verschiedene Flaschen hat noch einen weiteren praktischen Vorteil: Denn man sieht, wenn seine Wasseraufnahmefähigkeit erschöpft ist. Die Brocken verbacken durch das Wasser, und man muß dann die Füllung wechseln; aber nur in der ersten Flasche. Die zweite und besonders die dritte halten eine viel größere Zahl von Versuchen aus.

Auch bei der volumetrischen O_2-Bestimmung im Krogh-Spirometer muß der Wasserdampf berücksichtigt werden für die Reduktion der graphisch abgemessenen Rohwerte des Sauerstoffs auf die Normalbedingungen: 0° C, 760 mm Hg und Trockenheit. Die Innentemperatur des Apparates wird an einem Thermometer im Ausgang des Krogh-Spirometers vor und nach dem Versuch abgelesen, den auf 0° C reduzierten Barometerstand ergibt in üblicher Weise ein Hg-Barometer mit Thermometer im Versuchsraum und die Reduktion auf Trockenheit ist am einfachsten, wenn die Luft im Apparat mit Wasserdampf gesättigt ist. Letzteres läßt sich im größten Teil der Apparatur ermöglichen, nur in den Trocknungs- und Analysen-Flaschen

und ihren ganz kurzen Verbindungen herrscht Trockenheit. Da ihr Luftraum zwischen den Bröckeln gegenüber den durchschnittlich etwa 16 l der übrigen Apparatur aber recht gering ist, und da die Reduktion von Sättigung auf Trockenheit bei Zimmertemperatur überhaupt nur etwa 2% beträgt, ist die besondere Berücksichtigung dieses kleinen Trockenluftraumes im Apparat überflüssig, weil sie höchstens etwa einen O_2-Fehler von —0,3% ausmacht, also weit innerhalb der sonstigen Fehler liegt. Wir sättigen also die gesamte übrige Apparatur mit Wasserdampf und reduzieren den Sauerstoffverbrauch von Sättigung auf Trokkenheit. Dazu dient einmal ein Anfeuchter (s. S. 8) vor dem Patientenanschluß; dann liefert die Versuchsperson reichlich Wasserdampf und schließlich haben wir noch im Spirometer Gestelle mit dicht nebeneinander ausgespannten, breiten, nassen Filtrierpapierstreifen aufgestellt. Kontrollmessungen mit einem trockenen und einem mit Läppchen feucht gehaltenen Thermometer (Psychrometer) im Innern des laufenden Apparates ergaben, daß damit die Luft in den feucht gehaltenen Teilen des Apparates gesättigt war.

Kontroll-Analysen mit Alkoholverbrennung.

Zur Prüfung von Anschlußapparaten auf ihre biologische Brauchbarkeit, in erster Linie auf unbehinderte Atmung, muß man von Zeit zu Zeit Selbstversuche mit ihnen ausführen. — Um die Analysen-Genauigkeit von Gaswechselapparaten zu prüfen, verbrennt man gemessene Mengen von Alkohol und vergleicht die gefundenen Werte von O_2 und CO_2 mit den berechneten [10]).

Das Verbrennungsgerät wird vor den Einlaß zum Krogh-Spirometer anstelle des Patienten-Anschlusses in den Apparat luftdicht eingeschaltet, am zweckmäßigsten in einem regulierbaren Nebenstrom, damit die Flamme ruhig brennt [11]). — Die Alkohollampe läßt sich folgendermaßen zusammenstellen: Sie besteht aus einem möglichst großen, bauchigen Petroleum-

10) Beschreibung s. Literaturverzeichnis Nr. 1, S. 643; Nr. 2, S. 161 u. 194; Nr. 10, S. 128

11) Strack, Wannschaff und Bergfeld (Nr. 11).

lampen-Cylinder. Dieser ist unten und oben mit Gummistopfen verschlossen, durch die das Luftzu- und -ableitungsrohr führen. Durch den unteren Stopfen führt außerdem noch eine Hartglas-Kapillare (lichter Durchmesser 1 mm) und eine Zündschlinge. In der Kapillaröffnung sitzt ein Astbestdocht, der mehrere cm in die Kapillare hineinragt, aber nicht zu weit oben herausragen soll. Die Verbrennungskapillare ist bei Benedict mittels Gummischlauch mit einer Bürette verbunden. Durch Heben und Senken der Bürette wird die Verbrennung reguliert. Da aber der Alkohol aus dem Schlauch Wasser, Farbstoffe und dgl. extrahiert, verschmolzen wir die Kapillare mit einem U-Rohr. Dieses trägt unten einen Hahn, um nach beendetem Versuch den Alkohol bequem ablassen zu können. Am andern Ende ist das U-Rohr erweitert. Hier ist seitlich ebenfalls ein Hahn angebracht, der zum Druckausgleich über ein mit $CaCl_2$ gefülltes Lufttrockenröhrchen die Verbindung mit der Außenluft herstellen kann. Nach oben ist die Erweiterung des U-Rohrs durch einen Gummistopfen abgeschlossen. Durch ihn führt die gleichfalls oben mit einem Lufttrockenröhrchen gegen den Wasserdampf der Außenluft abgeschlossene Alkoholbürette.

Zu Beginn des Verbrennungsversuchs werden Kapillare und U-Rohr mit Alkohol auf gleiche Höhe gefüllt und eine Standmarke angebracht. Während der Verbrennung läßt man durch Einstellen des Bürettenhahns so viel Alkohol nachtropfen, wie verbrennt. Die verbrannte Alkoholmenge wird an der Bürettenteilung abgelesen.

Zur Verbrennung kann man wie Knipping absoluten Alkohol verwenden, der zum Trocknen über geglühtem $CuSO_4$ aufbewahrt werden und ein spez. Gewicht von 0,797 haben muß. Bequemer, weil weniger hygroskopisch, ist Alkohol von 90—92 Gewichtsprozent, dessen Konzentration mittels Alkoholometer oder Pyknometer festgestellt sein muß.

$$C_2H_5OH + 3\,O_2 = 2\,CO_2 + 3\,H_2O$$

Molgewichte:

$$C_2H_5OH = 46{,}05$$
$$O_2 = 32$$
$$CO_2 = 44$$

Beim Verbrennen von 1 gr C_2H_5OH werden gebraucht:

$$\frac{3 \cdot 32}{46{,}05} = 2{,}05 \text{ gr } O_2$$

$$= 1{,}458 \text{ Liter } O_2$$

und entstehen:

$$\frac{2 \cdot 44}{46{,}05} = 1{,}91 \text{ gr } CO_2$$

$$= 0{,}967 \text{ Liter } CO_2$$

$$RQ\ ^{12}) = \frac{0{,}967}{1{,}458} = 0{,}663.$$

Alkoholverbrennungen

Ergebnisse:

Datum	C_2H_5OH verbrannt ccm	berechnet: O_2 l	berechnet: CO_2 l	gefunden: O_2 l	gefunden: CO_2 gr	gefunden: CO_2 l	RQ
25. 3. 1935	2,5	2,905	1,927	2,90 (—0,2%)	3,78	1,913 (–0,7%)	0,660
26. 3. 1935	3,0	3,486	2,312	3,45 (—1,0%)	4,33	2,191 (–5,2%)	0,64
27. 3. 1935	2,5	2,905	1,927	2,84 (—2,2%)	3,73	1,887 (–2,0%)	0,664
31. 3. 1935	3,0	3,486	2,312	3,38 (—3,1%)	4,31	2,181 (–5,7%)	0,65

H_2O- und CO_2-Wägungen dazu:

Datum:	C_2H_5OH verbrannt ccm	I. $CaCl_2$	II. $CaCl_2$	III. $CaCl_2$	Natr. Kalk	IV. $CaCl_2$
25. 3. 1935	2,5	+ 4,80 gr	+0,40 gr	+0,09 gr	+3,62 gr	+0,16 gr
26. 3. 1935	3,0	+ 6,63 gr	+0,92 gr	+0,09 gr	+4,03 gr	+0,30 gr
27. 3. 1935	2,5	+11,49 gr	+0,11 gr	+0,01 gr	+3,73 gr	±0,00 gr
31. 3. 1935	3,0	+ 7,69 gr	+0,22 gr	+0,07 gr	+4,31 gr	±0,00 gr

Die hier mitgeteilten Versuche stammen aus einer Zeit, als wir an zahlreichen vorangegangenen Untersuchungen bereits eine ziemliche Übung in der Analysen-Technik erworben hatten. Das Ergebnis der vorstehenden Versuche ist befriedigend: Die re-

12) Infolge der 0,6%-igen Abweichung der CO_2 von den Gasgesetzen ist der RQ für Alkoholverbrennung nicht genau $^2/_3$, sondern 0,663.

spiratorischen Quotienten liegen nahe dem theoretischen Wert 0,663. Die Fehler der O_2-Werte sind gering (zwischen 0,2 und 3,1%, da sich die feinen, glatten Linien der O_2-Verbrauchs-Kurven bei den Alkoholverbrennungen sehr genau ausmessen lassen. Die prozentischen Fehler der CO_2-Bestimmungen müssen durchweg etwas größer sein als beim O_2, da der O_2-Verbrauch um 3 l, die CO_2-Bildung nur um 2 l liegt. Daß die Mengen des im $CaCl_2$ absorbierten Sättigungs-Wassers so verschieden sind, hängt mit der Strömungsgeschwindigkeit der Luft und mit der Temperatur zusammen, die beide absichtlich variiert wurden. Beim dritten Versuch liefen ca 600 l Luft bei 22° C um; beim ersten Versuch nur etwa 300 l bei 18° C; Versuch zwei und vier lagen mit wenig verschiedenen Temperaturen und Luftgeschwindigkeiten dazwischen.

Zwei CO_2-Werte fallen jedoch merklich schlechter aus und zwar die bei den größeren Mengen verbrannten Alkohols. Ob und wie etwa diese Fehler mit der verbrannten Alkoholmenge zusammenhängen könnten, war nicht festzustellen, denn selbstverständlich lief jeder Versuch nach Verbrennungsschluß solange weiter, bis die Spirometer-Kurve horizontal geworden, also alle CO_2 absorbiert und Temperatur-Gleichgewicht eingetreten war. Ungünstige Luftzirkulation oder Verbrennungsgeschwindigkeit scheinen auch nicht schuld zu sein: denn bei den beiden besseren Versuchen eins und drei herrschte die kleinste bzw. größte Lüftungsgeschwindigkeit; und bei den Versuchen eins und vier verbrannte jedes ccm Alkohol etwa gleich schnell und ungefähr doppelt so schnell wie bei den Versuchen drei und zwei.

Aber es fällt auf, daß a l l e Abweichungen n e g a t i v sind, und daß besonders die O_2-Werte von Tag zu Tag kleiner werden. Also hat offenbar ein mit der Zeit zunehmender anderer, n i c h t durch die Analysen bedingter Fehler sich eingeschlichen. Es liegt am nächsten anzunehmen, daß der Alkohol sich trotz aller Vorsicht durch allmähliche Wasseraufnahme ein wenig verdünnt hat. Leider ist in den Protokollen nicht vermerkt, ob etwa um diese Zeit das geglühte $CuSO_4$ unter dem Alkohol erneuert werden mußte, was mehrmals im Laufe der ganzen Untersuchungen nötig wurde. Wenn tatsächlich der Alkohol sich ent-

sprechend der Abnahme seines O_2-Verbrauches verdünnt hat, würde die CO_2-Abweichung des vierten Versuchs innerhalb der Unsicherheitsbreite liegen. — Es ist wie gesagt zweckmäßiger 90%igen Alkohol zu verbrennen.

Jedenfalls sind die Ergebnisse der Alkoholverbrennungen so, daß man mit der Genauigkeit dieses vereinfachten und verbilligten gewichtsanalytischen Verfahrens für erwachsene Menschen zufrieden sein kann. — Es sind weitere Versuche im Gange, um zu prüfen, ob mit stärkerer Trocknung und mit anderen CO_2- und H_2O-Absorbention eine noch größere analytische Genauigkeit erzielbar ist, etwa für Untersuchungen an Säuglingen und Tieren.

Über Versuche mit den drei Methoden an erwachsenen Menschen unter verschiedenen Ernährungsbedingungen soll am Schluß berichtet werden.

2. Volumetrische CO_2-Bestimmung mit zwei Gasuhren.

Verfügt man über zwei gute, gleiche, nasse Gasuhren, dann ist das von Hanriot und Richet und von Bethloff benutzte Prinzip zum mindesten theoretisch recht einfach: Zwischen Rotationspumpe und Patientenanschluß ist eine große Flasche mit Natronkalk zwischen zwei Gasuhren eingeschaltet. Hält man die Temperatur und die Feuchtigkeit der Luft vor beiden Gasuhren gleich, dann ist ihr Gangunterschied gleich dem im Natronkalk absorbierten Kohlensäurevolumen.

Der Natronkalk muß grobkörnig und in der Flasche möglichst locker gepackt sein, damit beide Gasuhren unter gleichem Druck stehen. Sollte gleicher Druck trotzdem nicht zu erreichen sein, so muß man die Drucke an den verschiedenen Stellen der Leitung mit Wassermanometern messen und Unterschiede bei der Reduktion berücksichtigen. — Wie schnell die CO_2 absorbiert wird, ist nebensächlich, da man die Luft im System nach Ausschalten des Patienten solange weiter zirkulieren lassen kann, bis alle CO_2 absorbiert ist, also die Spirometer-Kurve horizontal läuft und der Gangunterschied der Gasuhren konstant bleibt.

Die Luft wird im Natronkalk erwärmt und trockener. Das würde einen sehr erheblichen Fehler bedingen; aber er läßt sich

leicht dadurch beseitigen, daß man zwischen Natronkalk und zweiter Gasuhr einen so langen Anfeuchter einschaltet, bis die Luft mit der gleichen Temperatur und wieder feuchtigkeitsgesättigt ebenso wie in die erste Gasuhr auch in die zweite eintritt. Das läßt sich immer erreichen nach Ausweis von Temperatur und Psychrometer-Kontrollen vor beiden Gasuhren.

Die größte Schwierigkeit macht es dagegen, einen richtigen und genau gleichen Gang der beiden Gasuhren herzustellen und längere Zeit zu erhalten. Das gelingt durch Regulieren des Wasserstandes jedoch nur mit großer Mühe und Sorgfalt; am besten mit außen an den Uhren angebrachten Wasserstands-Rohren. Aber man muß den Gang der Uhren trotzdem vor und nach jedem Versuch durch Eichung kontrollieren und einen etwaigen Gangunterschied bei der Berechnung berücksichtigen.

Diese Genauigkeit ist nötig, weil während eines Versuches etwa 400—500 l Luft durch die Uhren laufen. Infolgedessen fällt ein kleiner unbemerkter und unkorrigierter Gangfehler erheblich ins Gewicht bei den 2—3 l Gangunterschied durch CO_2-Absorption.

Mit der nötigen Sorgfalt gelingt es, gute Resultate zu erzielen, wie die folgenden

Alkoholverbrennungen

zeigen:

Datum:	C_2H_5OH verbrannt ccm	berechnet: O_2 l	berechnet: CO_2 l	gefunden: O_2 l	gefunden: CO_2 l	RQ
5. 6. 1935	3,0	3,486	2,312	3,455 (—0,9%)	2,322 (+0,4%)	0,673
5. 6. 1935	3,0	3,486	2,312	3,463 (—0,7%)	2,320 (+0,3%)	0,669

3. Volumetrische CO_2-Bestimmung nach Knipping.

Schließlich haben wir untersucht, ob sich das bequeme und viel verwendete Verfahren von Knipping nicht auch in Verbindung mit dem Krogh-Spirometer anwenden läßt: die CO_2 wird in Kalilauge absorbiert und nach Ausschalten der Versuchsperson und vollständiger Beendigung der Absorption mit

Schwefelsäure wieder ausgetrieben; die Austreibung wird mit dem Spirometer graphisch registriert und die Kurven ausgemessen.

Das Verfahren ist so oft beschrieben, daß wir auf Einzelheiten nicht einzugehen brauchen. Wir haben mit den von Knipping angegebenen und von Dargatz, Hamburg, bezogenen Apparateteilen und Reagentien — den Gaswaschflaschen [13]) zur CO_2-Absorption, den zugehörigen Kühlbehältern[14]), den Dreiwegehähnen [15]) zum Parallelschalten bei Doppelbestimmungen und langdauernden Untersuchungen, dem Stoßdämpfer [16]) hinter der Gaswaschflasche, der Kalilauge und Schwefelsäure in Ampullen [17]), — gearbeitet und uns im wesentlichen an die Vorschriften von Knipping gehalten. Nur haben wir abweichend von Knipping mit den S. 8 und 14—15 beschriebenen Anfeuchtern vor dem Patienten und im Krogh-Spirometer die Luftfeuchtigkeit hinter der 50%igen Kalilauge wieder auf volle Sättigung gebracht und dem entsprechend die volumetrisch gemessenen Gase von Sättigung auf Trockenheit reduziert.

Alkohlverbrennung.

Datum:	C_2H_5OH verbrannt ccm	berechnet: O_2 l	berechnet: CO_2 l	gefunden: O_2 l	gefunden: CO_2 l	RQ
19. 6. 1935	3,0	3,486	2,312	3,344 (—4,1%)	2,268 (—1,9%)	0,678

Dieses eine Beispiel von mehreren Verbrennungen zeigt, daß die Knippingsche CO_2-Bestimmung auch in Verbindung mit der Kroghschen O_2-Messung gute Resultate gibt. Der Alkohol hat sich offenbar durch Wasseraufnahme wieder ein wenig verdünnt: beide Werte sind etwas zu niedrig.

13) 2 Gaswaschflaschen: Preis 66 RM.
14) 2 Kühlbehälter: Preis 36 RM.
15) 2 große Dreiwegehähne: Preis 25 RM.
16) 1 Stoßdämpfer: Preis 11.50 RM.
17) 20 Ampullen Kalilauge und 20 Ampullen Schwefelsäure: Preis 37 RM.

Umsatzversuche am Menschen und klinische Verwendbarkeit.

Um die Brauchbarkeit der untersuchten Verfahren auch am Menschen zu erproben, haben wir teils Grundumsatzversuche, teils Versuche über den Leistungszuwachs und die Änderung des RQ nach verschiedenartiger Nahrungsaufnahme an normalen Versuchspersonen angestellt.

1. Volumetrische CO_2-Bestimmung mit 2 Gasuhren.

Grundumsatzversuch am 8. 3. 1934.
Vp 23 Jahre; 1,72 m, 74,5 kg; männlich.
Soll-Grundumsatz (Benedict): 1796 Kal. in 24 Stunden.
Versuch um 10 Uhr. Letzte Mahlzeit vor 15 Stunden.
Versuchsdauer 10½ Minuten.

O_2-Verbrauch = 2,75 l
CO_2-Abgabe = 2,06 l

$$RQ = \frac{2{,}06}{2{,}75} = 0{,}75$$

$$G.U. = \frac{2{,}75 \cdot 4{,}74 \cdot 60 \cdot 24}{10{,}5} = 1788 \text{ Kal. } (= -0{,}4\,\%)$$

2. Gewichtsanalytische CO_2-Bestimmung.

Grundumsatzversuch am 25. 6. 1935.
Andere Vp. 25 Jahre; 1,73 m; 70 kg; männlich.
Soll-Grundumsatz: 1726 Kal.
Versuch um 9 Uhr. Letzte Mahlzeit vor 20 Stunden.
Versuchsdauer 14½ Minuten.

O_2-Verbrauch = 3,65 l
CO_2-Abgabe = 6,25 g = 3,16 l

$$RQ = \frac{3{,}16}{3{,}65} = 0{,}86$$

$$G.U. = \frac{3{,}65 \cdot 4{,}875 \cdot 60 \cdot 24}{14{,}5} = 1767 \text{ Kal. } (= +2{,}4\,\%)$$

Daran anschließend Ruhe-Umsatzbestimmung mit der gleichen Vp. nach Genuß von $^1/_4$ Liter Milch und 1 Brötchen.

Umsatzversuch am 25. 6. 1935, 11 Uhr.

Versuchsdauer 11 Minuten.

O_2-Verbrauch $= 3{,}47$ l
CO_2-Abgabe $= 5{,}36$ g $= 2{,}71$ l
RQ $= \frac{2{,}71}{3{,}47} = 0{,}78$
Umsatz $= \frac{3{,}47 \cdot 4{,}776 \cdot 60 \cdot 24}{11} = 2169$ Kal. $(= +23\%)$

Die gleiche Vp. wie bei den beiden vorhergehenden Versuchen. Ruhe-Umsatz-Versuch am 27. 6. 1935 um 9 Uhr, etwa $^1/_2$ Stunde nach Genuß von 2 Tassen schwarzem Kaffee, 1 Bretzel und 8 Stück Zucker.

Versuchsdauer 13 Minuten.

O_2-Verbrauch $= 3{,}522$ l
CO_2-Abgabe $= 6{,}25$ g $= 3{,}163$ l
RQ $= \frac{3{,}163}{3{,}522} = 0{,}90$
Umsatz $= \frac{3{,}522 \cdot 4{,}924 \cdot 60 \cdot 24}{13} = 1921$ Kal. $(= +9\%)$

3. Volumetrische CO_2-Bestimmung nach Knipping.

Ruhe-Umsatz-Versuch am 27. 6. 1935, 10 Uhr.

Dieser Versuch schloß sich eine Stunde später an die vorstehende Umsatzbestimmung an.

Versuchsdauer 14 Minuten.

O_2-Verbrauch $= 3{,}72$ l
CO_2-Abgabe $= 3{,}637$ l
RQ $= \frac{3{,}637}{3{,}72} = 0{,}978$
Umsatz $= \frac{3{,}72 \cdot 5{,}02 \cdot 60 \cdot 24}{14} = 1920$ Kal $(= +9\%)$.

Diese Umsatzversuche entsprechen durchweg den Voraussagen: Der G.U.der ersten beiden Versuche weicht kaum vom Soll-Grundumsatz ab. — Der dritte Versuch nach eiweißreicherem Frühstück (Milch und Brötchen) zeigt deutlich die hohe spezifisch-dynamische Wirkung des Eiweiß an dem Leistungszuwachs.

— Für die Versuche vier und fünf nach kohlehydratreicherem Frühstück ist charakteristisch der hohe RQ und die niedrige spezifisch-dynamische Wirkung; 1½ Stunden nach dem Frühstück ist der RQ noch höher als ½ Stunde danach.

Damit dürfte gezeigt sein, daß diese einfachen und wohlfeilen Apparaturen, wenn sie mit Experimentalkritik benutzt werden, brauchbare Gasumsatzgeräte sind. Ihre gasanalytische Sicherheit ist wohl erheblich größer als die schwer vermeidbaren Schwankungen im Verhalten der Versuchspersonen.

Was zum Schluß die klinische Verwendbarkeit der Methoden angeht, so ist die gewichtsanalytische CO_2-Messung in Verbindung mit dem Krogh-Spirometer durchaus brauchbar (Anschaffungspreis einschließlich Krogh-Spirometer und Waage etwa 650 RM). Denn das Wägen mit der beschriebenen Waage ist in dem von uns benutzten Verfahren einfach und nicht zeitraubend: es besteht in vier Schwingungsbeobachtungen, die sich aus dem Ablesen von im ganzen 12 Umkehrpunkten zusammensetzen. Das kann bei Übung in 10 Minuten erledigt sein. Nur muß man allerdings mit dem Wägen warten, bis die Natronkalk- und $CaCl_2$-Flasche sich wieder auf Zimmertemperatur abgekühlt haben. Das kann eine halbe bis eine Stunde dauern. Aber mit Dreiwegehähnen vor und hinter diesen Flaschen und Parallelschaltung von je zwei Flaschen-Paaren lassen sich bequem mehrere Untersuchungen nacheinander machen.

Die volumetrische CO_2-Messung mit zwei Gasuhren ist in der von uns probierten Form wohl klinisch ungeeignet, weil die Gasuhren — wenigstens nach unseren Erfahrungen —, wenn sie exakt arbeiten sollen, viel zu viel Zeit für ihre dauernde Eichung erfordern.

Die volumetrische CO_2-Messung nach Knipping hat den Beweis ihrer klinischen Anwendbarkeit längst erbracht und wird auch durch die Kombination mit dem Krogh-Spirometer nicht beeinträchtigt (Anschaffungspreis einschließlich Krogh-Spirometer etwa 500 RM.) Im hiesigen Institut ist mit dem Krogh- und dem Knipping-Spirometer gearbeitet worden und in mancher Hinsicht kann man zweifelhaft sein, — besonders in der hier beschriebenen Anordnung —, mit welchem von beiden bequemer und sicherer zu arbeiten ist.

Zusammenfassung.

Es werden drei gasanalytische Methoden für Kohlensäure-Messung untersucht, die als Kreislaufapparate in Verbindung mit dem Krogh schen Spirometer als billige und trotzdem hinreichend genaue Verfahren zur gleichzeitigen CO_2- und O_2-Bestimmung für physiologische und klinische Ruhe-Umsatz-Untersuchungen am Menschen dienen sollen.

Davon sind eine gewichtsanalytische CO_2-Bestimmung (ähnlich der Benedict schen) und die volumetrische von Knipping in Verbindung mit dem Krogh-Spirometer physiologisch und klinisch gut brauchbar, wie Alkoholverbrennungen und Umsatz-Untersuchungen am Menschen zeigen.

Herrn Professor A. Kohlrausch danke ich für seine Ratschläge und seine Unterstützung bei Abfassung dieser Untersuchung.

Literatur.

1. Fr. G. Benedict: Abderhaldens Handbuch der biolog. Arbeitsmethoden Abt, IV. Teil 10, Heft 3.
2. P. Rona: Praktikum der physiolog. Chemie. Dritter Teil: Stoffwechsel und Energiewechsel von P. Rona und H. W. Knipping. (Berlin, 1928, Julius Springer).
3. Aehle: Methodisches zur Grundumsatzbestimmung bei Ratten (Klin. Wochenschr. 14. 638).
4. Benedict: Ein Universalrespirationsapparat (Dtsch. Arch. f. Kl. Med. 1912).
5. Dethloff: Method. Beiträge zur Gaswechselmessung durch registrierende Spirometer (Inaug.-Dissert. Berlin 1923).
6. Helmreich u. Wagner: Über ein neues Prinzip zur indirekten Bestimmung der Kohlensäure und des RQ mit dem Differenzspirometer (Biochem. Ztschr. **145**, 77; **149**, 560, 1924).
7. Krogh: Ein Respirationsapparat zur klinischen Bestimmung des Energieumsatzes des Menschen (Wien. Klin Wochenschr. 1922, 290).
8. Mansfeld: Neuer Apparat zur graphischen Registrierung von CO_2-Ausscheidung (Klin. Wochenschr. 1933, 668).
9. Knipping: Über die Kontrolle der Gasstoffwechseluntersuchung (Ztschr. f. d. ges. exper. Med. Bd. 50, Heft 3 und 4; 1926).
10. Knipping und Kowitz: Klinische Gasstoffwechseltechnik (Berlin 1928, Julius Springer).
11. Strack, Wannschaff und Bergfeld: Stoffwechseluntersuchungen am narkotisierten Hund. I. Der Respirationsapparat nach Benedict, umgebaut zur Durchführung von Dauerinfusionen (Berichte der math.-phys. Klasse d. Sächs. Akad. d. Wissensch. **88**, 51 und 52; 1936).
12. P. Liebesny und H. Schwarz: Biochem. Ztschr. **154**, 191 (1924).
13. J. G. Dusser de Barenne und G. C. E. Burger: Abderhaldens Handb. d. biol. Arbeitsmeth. Abt. IV, Teil 10, Heft 6, S. 937.
14. A. Lublin: Klin. Wochenschr, **5**, 1268 (1926).

Lebenslauf.

Ich, Wilhelm Kußmaul, bin am 19. März 1910 in Gnadental OA. Ohringen geboren als Sohn des Hauptlehrers Friedrich Kußmaul und seiner Frau Elisabeth geb. Thierer. Von 1916 bis 1919 besuchte ich die Volksschule in Gnadental und Wasseralfingen. Darauf kam ich auf die Realschule in Aalen. Im Jahre 1922 ging ich über auf das Gymnasium in Ellwangen. Dem ev.-theol. Seminar Maulbronn-Blaubeuren gehörte ich von 1925 bis 1929 an. Nachdem ich in Blaubeuren das Reifezeugnis erworben hatte, studierte ich in Tübingen (S.S. 29 bis S.S. 30), Königsberg i. Pr. (W.S. 30/31 bis S.S. 31), Wien (W.S. 31/32 bis S.S. 32) und wieder in Tübingen (W.S. 32 bis S.S. 34). Die ärztliche Vorprüfung legte ich in Königsberg ab und das Staatsexamen im W.S. 34/35 in Tübingen. Während des praktischen Jahres war ich vom 1. 2. 35 bis 30. 6. 35 am Physiologischen Institut der Universität Tübingen (Prof. Dr. Kohlrausch) tätig und vom 1. 7. 35 bis 31. 1. 36 am Krankenhaus Elim in Hamburg.

Zum 31. 1. 36 erhielt ich vom Württ. Innenministerium meine Approbation als Arzt für das Deutsche Reich.

Die Untersuchungen zu meiner Doktorarbeit habe ich als Kandidat der Medizin im S.S. 1933, W.S. 1933/34, S.S. 1934 und in meinem praktischen Jahr vom 1. 2. bis 30. 6. 1935 ausgeführt.